

# Kapitel 5

## Berechnung der Ressourceneffizienz

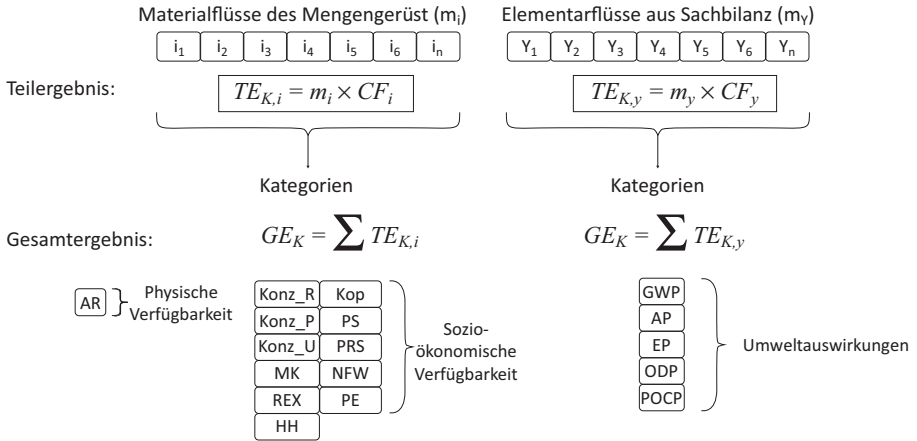
### Inhaltsverzeichnis

5.1	Allgemeines Vorgehen	51
5.2	Berechnung der Verfügbarkeit für Metalle und fossile Rohstoffe	52
5.2.1	Berechnung der physischen Verfügbarkeit	52
5.2.2	Berechnung der sozio-ökonomischen Verfügbarkeit	53
5.3	Berechnung der gesellschaftlichen Akzeptanz	55
5.4	Berechnung der Umweltauswirkungen	55
5.5	Ermittlung der Ressourceneffizienz	57

In den folgenden Unterkapiteln wird die Berechnung der Ressourceneffizienz basierend auf den in Kap. 3 ermittelten Sachbilanzdaten und der in Kap. 4 beschriebenen Bewertung durchgeführt. Die Erklärung der einzelnen Berechnungsschritte wird am bereits zuvor eingeführten Beispiel des Aluminium- und Silberkabels exemplarisch dargestellt.

### 5.1 Allgemeines Vorgehen

In der ESSENZ-Methode werden die zwei Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“, „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“, sowie die zwei Dimensionen „Gesellschaftliche Akzeptanz“ und „Umweltauswirkungen“ berechnet. Diese erfolgt durch den Anwender auf die in Abb. 5.1 dargestellte Weise. Die Materialflüsse des Mengengerüsts ( $m_i$ ) und die Elementarflüsse ( $m_e$ ) aus der Sachbilanz werden mit ihren entsprechenden Charakterisierungsfaktoren (CF) zu Teilergebnissen ( $TE_{K,i}$ ) multi-



**Abb. 5.1** Ebenen der Ergebnisbestimmung der Ressourceneffizienzbewertung

pliziert. So wird der spezifische Beitrag der Material- und Elementarflüsse innerhalb einer Kategorie K ermittelt. Werden alle spezifischen Beiträge einer Kategorie aufsummiert, ist es möglich, das Gesamtergebnis ( $GE_K$ ) der jeweiligen Kategorie zu ermitteln. Im Folgenden ist detailliert dargestellt, wie die Berechnung für die einzelnen Kategorien durchzuführen ist.

## 5.2 Berechnung der Verfügbarkeit für Metalle und fossile Rohstoffe

In den folgenden Abschnitten wird erläutert, wie die Berechnung für die Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“, „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ und die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ durchzuführen ist.

### 5.2.1 Berechnung der physischen Verfügbarkeit

Die in Abschn. 4.1 erläuterten Indikatoren für die Bewertung der Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ (AADP bzw. ADP-Indikatoren) werden mit den ermittelten Massen ( $m_i$ ) aus dem Mengengerüst multipliziert (siehe Gl. 5.1, Gl. 5.2 und Gl. 5.3). So wird das Teilergebnis ( $TE_i$ ) für die Kategorie abiotischer Ressourcenverbrauch für das betrachtete Metall oder den fossilen Rohstoff ermittelt:

$$TE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch},i} = m_i \times ADP_{\text{elementar},i} \quad \text{Gl. 5.1}$$

$$TE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch},i} = m_i \times ADP_{\text{fossil},i} \quad \text{Gl. 5.2}$$

$$TE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch},i} = m_i \times AADP_i \quad \text{Gl. 5.3}$$

Auf diese Weise kann die Bedeutung eines jeden Metalls oder fossilen Rohstoffs hinsichtlich der Kategorie betrachtet werden.

In Abb. 5.2 ist die Berechnung für die Komponenten des Silber- und Aluminiumkabels dargestellt. Die Masse des Silbers im Silberkabel bzw. des Aluminiums im Aluminiumkabel wird mit dem entsprechenden  $ADP_{\text{elementar}}$ -Indikator multipliziert. Der spezifische Beitrag des Erdöls für die Kategorie wird analog ermittelt, allerdings über den  $ADP_{\text{fossil}}$ -Indikator. Da das Silberkabel aus den Komponenten Silber und Erdöl besteht, werden auch für die weiteren Kategorien jeweils zwei Teilergebnisse berechnet. Bestünde das Produkt aus entsprechend mehr Materialien, gäbe es auch mehr Teilergebnisse, die zusammenge-rechnet werden würden.

**Berechnung der Teilergebnisse für die Kategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch**

$$TE_{\text{Silber}} = 0,38 \text{ kg} \times 1,18 \text{ Sb} - \text{Äqv} = 0,4484 \text{ kg Sb-Äqv.}$$

$$TE_{\text{Aluminium}} = 0,18 \text{ kg} \times 1,09 \times 10^{-9} \text{ Sb-Äqv} = 1,96 \times 10^{-10} \text{ kg Sb-Äqv.}$$

$$TE_{\text{Erdöl}} = 0,06 \text{ MJ} \times 0,023 \frac{\text{kg Sb-Äqv}}{\text{MJ}} = 0,0015 \text{ kg Sb-Äqv.}$$

**Abb. 5.2** Berechnung für Silber und Aluminiumkabel: Abiotischer Ressourcenverbrauch

Für das hier verwendete Beispiel ist eine Zusammenrechnung der Teilergebnisse zu einem Gesamtergebnis nicht möglich, da  $ADP_{\text{elementar}}$  und  $ADP_{\text{fossil}}$  nicht miteinander verrechnet werden können. Nur die Teilergebnisse, die mit dem gleichen Indikator ermittelt wurden, können zu einem Gesamtergebnis für die Kategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch aufsummiert werden.

Besteht das betrachtete Produktsystem aus mehreren Metallen, die zu einem Gesamtergebnis ( $GE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch}}$ ) zusammengeführt werden können, ist folgender Rechenschritt durchzuführen (vgl. Gl. 5.4):

$$GE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch}} = \sum TE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch}, i} \quad \text{Gl. 5.4}$$

Optional ist es möglich, Gesamt- und Teilergebnisse zweier vergleichbarer Produkte nach dem in Kap. 7 beschriebenen Vorgehen gegenüberzustellen.

### 5.2.2 Berechnung der sozio-ökonomischen Verfügbarkeit

Die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ besteht aus insgesamt 11 Kategorien. Metall- oder rohstoffspezifische Teilergebnisse ( $TE_{K,i}$ ) der einzelnen Kategorien (z. B. politische Stabilität) werden ermittelt, indem die Massen ( $m_i$ ) aus

dem Mengengerüst mit dem Charakterisierungsfaktor ( $CF_{K,i}$ ) multipliziert werden (siehe Gl. 5.5):

$$TE_{K,i} = m_i \times CF_{K,i} . \quad \text{Gl. 5.5}$$

In Abb. 5.3 ist exemplarisch die Berechnung des Teilergebnisses für die Kategorie politische Stabilität dargestellt.

**Berechnung der Teilergebnisse der Kategorie Politische Stabilität**

$$TE_{PS,Silber} = 0,38 \text{ kg} \times 4,03 \times 10^{10} \frac{1}{\text{kg}} = 1,53 \times 10^{10}$$

$$TE_{PS,Erdöl} = 0,06 \text{ kg} \times 178.144 \frac{1}{\text{kg}} = 10.689$$

**Abb. 5.3** Exemplarische Berechnung für Silberkabel: Teilergebnisse für die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ am Beispiel der Kategorie Politische Stabilität

Die Masse des Silbers im Silberkabel wird mit dem entsprechenden Charakterisierungsfaktor der Kategorie für Silber multipliziert. Der spezifische Beitrag des Erdöls für die Kategorie wird ebenso ermittelt, indem die Masse mit dem Charakterisierungsfaktor multipliziert wird. Die Berechnung der anderen Kategorien erfolgt analog. Da das Silberkabel aus den Komponenten Silber und Erdöl besteht, werden auch für die weiteren Kategorien jeweils zwei Teilergebnisse berechnet. Bestünde das Produkt aus entsprechend mehr Materialien, würden auch mehr Teilergebnisse ermittelt werden.

Zur Ermittlung des Gesamtergebnisses ( $GE_K$ ) für die einzelnen Kategorien sind die Teilergebnisse aufzusummieren (siehe Gl. 5.6):

$$GE_K = \sum TE_{K,i} . \quad \text{Gl. 5.6}$$

In Abb. 5.4 ist die exemplarische Berechnung des Gesamtergebnisses für die Kategorie politische Stabilität dargestellt. Die Berechnung des Gesamtergebnisses erfolgt, indem die beiden Teilergebnisse aufsummiert werden. Die Berechnung der anderen Kategorien erfolgt analog. Würde das Produkt aus mehr Materialien bestehen, gäbe es auch mehr Teilergebnisse, die für das Gesamtergebnisse aufsummiert werden müssten.

#### Berechnung des Gesamtergebnisses der Kategorie Politische Stabilität

$$GE_{PS} = TE_{PS,Silber} + TE_{PS,Erdöl} = 10.689 + 1,53 * 10^{10} = 1,53 * 10^{10}$$

**Abb. 5.4** Exemplarische Berechnung für Silberkabel: Gesamtergebnis für die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ am Beispiel der Kategorie Politische Stabilität

Somit kann ein Gesamtergebnis für die einzelnen Kategorien der Dimension „sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ ermittelt werden. Optional ist es möglich, Teil- und Gesamtergebnisse von vergleichbaren Produkten nach dem in Kap. 7 beschriebenen Vorgehen einander gegenüberzustellen.

### 5.3 Berechnung der gesellschaftlichen Akzeptanz

Die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ besteht aus den zwei Kategorien Einhaltung von sozialen Standards und Einhaltung von Umweltstandards. Für die Bewertung der Einhaltung von sozialen und Umweltstandards werden die Screeningfaktoren nicht mit dem Mengengerüst, also der Masse der verwendeten Metalle und fossilen Rohstoffe, multipliziert. Die gesellschaftliche Akzeptanz ist unabhängig davon, ob 1 g oder 1 kg des Metalls oder fossilen Rohstoffs verwendet werden. In der Analyse zur Bestimmung der potenziell risikobehafteten Metalle und fossilen Rohstoffe im Produkt werden nur die im Mengengerüst verwendeten Metalle und fossilen Rohstoffe betrachtet, nicht aber deren Mengen.

### 5.4 Berechnung der Umweltauswirkungen

Bei der Bewertung der Umweltauswirkungen werden fünf Kategorien betrachtet. Die Berechnung der Teilergebnisse erfolgt, indem die Masse des Elementarflusses ( $m_y$ ) (z. B. CO<sub>2</sub>-Emissionen) über den gesamten Lebensweg (wie in Kap. 3 beschrieben) mit dem entsprechenden Charakterisierungsfaktor ( $CF_{K,y}$ ) einer Kategorie K multipliziert wird (siehe Gl. 5.7):

$$TE_{K,y} = m_y \times CF_{K,y} \quad \text{Gl. 5.7}$$

Somit kann der Einfluss eines jeden Elementarflusses auf die entsprechende Wirkungskategorie ausgewiesen werden.

In Abb. 5.5 ist ein Ausschnitt aus der Wirkungskategorie Klimawandel (GWP) für das Beispiel Silberkabel dargestellt. Dieser Schritt wird bei der Verwendung einer Ökobilanzsoftware automatisch durchgeführt.

**Berechnung der Teilergebnisse für die Kategorie Klimawandel**

$$TE_{GWP,CO_2} = 205 \text{ kg} \times 1 \text{ CO}_2\text{Äqv.} = 205 \text{ kg CO}_2 - \text{Äqv.}$$

⋮

$$TE_{GWP,CH_4} = 0,5 \text{ kg} \times 25 \text{ CO}_2\text{Äqv.} = 12,5 \text{ kg CO}_2 - \text{Äqv.}$$

**Abb. 5.5** Exemplarische Berechnung für Silberkabel: Teilergebnisse für die Kategorie Klimawandel

Zur Ermittlung des Gesamtergebnisses sind die Teilergebnisse aufzusummieren (siehe Gl. 5.8). Eine Aggregation der einzelnen Wirkungskategorien der Dimension „Umweltauswirkungen“ ist aufgrund der unterschiedlichen Einheiten nicht ohne Weiteres möglich:

$$GE_K = \sum TE_{K,y} \quad \text{Gl. 5.8}$$

In Abb. 5.6 ist die Berechnung des Gesamtergebnisses für das Beispiel des Silberkabels dargestellt. Im Falle des Silberkabels werden alle charakterisierten Elementarflüsse zu einem Gesamtwert von 117 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. aufaddiert. Für die anderen Kategorien der Dimension „Umweltauswirkungen“ wird nach dem gleichen Verfahren vorgegangen.

**Berechnung der Gesamtergebnisse für die Kategorie Klimawandel**

$$GE_{GWP} = 45 \text{ kg CO}_2\text{Äqv.} \times \dots + 12,5 \text{ kg CO}_2\text{Äqv.} = 117 \text{ kg CO}_2 - \text{Äqv.}$$

**Abb. 5.6** Exemplarische Berechnung für Silberkabel: Gesamtergebnisse für die Kategorie Klimawandel

Optional können die Gesamtergebnisse der beiden Bereiche nach dem in Kap. 7 beschriebenen Vorgehen bei vergleichbaren Produkten gegenübergestellt werden.

## 5.5 Ermittlung der Ressourceneffizienz

Nach der Berechnung der einzelnen Kategorien der Dimensionen werden diese mit der funktionellen Einheit, die den Nutzen quantifiziert, in Bezug gesetzt.

Im Allgemeinen gilt: Je größer der berechnete Wert, desto größer ist die Ressourceneffizienz des Produktes. Dies ist mathematisch einfach erklärbar: Wenn der Zähler des Bruches (die funktionelle Einheit) durch eine kleine Zahl (Ergebnisse für die betrachteten Kategorien je funktioneller Einheit) dividiert wird, ist das Ergebnis entsprechend größer, als würde derselbe Zähler durch einen großen Wert dividiert werden.

Obwohl die funktionelle Einheit somit indirekt zweimal bei der Berechnung der Ressourceneffizienz berücksichtigt wird, kommt es zu keiner direkten Doppeltzählung. Die ermittelten Ergebnisse für die betrachteten Kategorien sind auf die funktionelle Einheit bezogen, da die ESSENZ-Methode in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik entwickelt wurde. Die funktionelle Einheit wird dabei allerdings nur indirekt über die Referenzflüsse einbezogen. „Je funktionelle Einheit“ (siehe ISO 14044, S 37) ist daher nicht mathematisch zu interpretieren – es findet keine Division der Ergebnisse durch die funktionelle Einheit statt. Das „je“ bedeutet lediglich, dass die Ergebnisse auf die funktionelle Einheit bezogen sind. Zur Ermittlung der Ressourceneffizienz wird das ermittelte Ergebnis dann mit der funktionellen Einheit mathematisch in Bezug gesetzt: Die funktionelle Einheit als Nutzen des betrachteten Produktsystems wird durch die Ergebnisse der betrachteten Kategorien dividiert.

Für alle Kategorien der betrachteten Dimensionen gilt Folgendes:

- Je größer der Wert für die Kategorie abiotischer Ressourcenverbrauch der Teildimension „Physische Verfügbarkeit“, desto größer ist die Aufzehrung der Ressourcen – die Ressourceneffizienz ist entsprechend gering.
- Je größer der Wert für die Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“, desto größer ist das potenzielle Risiko, dass es zu einer Einschränkung der Verfügbarkeit kommt – die Ressourceneffizienz ist entsprechend gering.
- Je größer der Wert für die Kategorien der Dimension „Umweltauswirkungen“, desto höher sind die potenziellen Umweltauswirkungen – die Ressourceneffizienz ist entsprechend gering.

Dabei ist wichtig zu bedenken, dass die in der ESSENZ-Methode als Standard definierten 21 Kategorien immer zusammen betrachtet werden müssen, um eine Aussage über die Ressourceneffizienz treffen zu können.

Für das Beispiel des Silber- und Aluminiumkabels ist die zugehörige funktionelle Einheit (FU): Übertragung von 0,06 kWh bei gleichem Spannungsabfall über 5 m (0,012 kWh/m). Die FU wird durch das Ergebnis der Kategorie abiotischer Ressourcenverbrauch (in diesem Fall für  $ADP_{\text{elementar}}$  mit 0,453 kg Sb-Äqv.) dividiert (Gl. 5.9):

$$RE_{AR} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{0,453 \text{ kg Sb-Äqv.}} = 0,026 \left[ \frac{\text{kWh/m}}{\text{kg Sb-Äqv.}} \right]. \quad \text{Gl. 5.9}$$

Die RE des Aluminiumkabels für die gleiche Kategorie wird nach Gl. 5.10 bestimmt:

$$RE_{AR} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{1,96 \times 10^{-10} \text{ kg Sb-Äqv.}} = 6,1 \times 10^7 \left[ \frac{\text{kWh/m}}{\text{kg Sb-Äqv.}} \right] \quad \text{Gl. 5.10}$$

Die Ergebnisse der anderen Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomischen Verfügbarkeit“ werden ebenso zu der FU ins Verhältnis gesetzt. Dies wird exemplarisch für die Wirkungskategorie politische Stabilität in Gl. 5.11 und Gl. 5.12 dargestellt:

$$RE_{PS} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{7.386.395 [-]} = 1,63 \times 10^{-9} \left[ \frac{\text{kWh/m}}{[-]} \right]. \quad \text{Gl. 5.11}$$

$$RE_{PS} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{2266 [-]} = 5,3 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{kWh/m}}{[-]} \right]. \quad \text{Gl. 5.12}$$

Das gleiche Vorgehen ist auch für die andere Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ anzuwenden. Die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ wird über Screeningindikatoren dargestellt, die nicht in die direkte RE-Bewertung eingehen.

Für die Dimension „Umweltauswirkungen“ wird nach dem gleichen Vorgehen wie bei der Verfügbarkeitsbetrachtung die Ressourceneffizienz ermittelt (exemplarisch für die Wirkungskategorie Klimawandel in Gl. 5.13 und Gl. 5.14):

$$RE_{GWP} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{117 \text{ CO}_2\text{-Äqv.}} = 1,0 \times 10^{-4} \left[ \frac{\text{kWh/m}}{[\text{kg CO}_2\text{-Äqv.}]} \right]. \quad \text{Gl. 5.13}$$

$$RE_{GWP} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{190 \text{ CO}_2\text{-Äqv.}} = 6,3 \times 10^{-5} \left[ \frac{\text{kWh/m}}{[\text{kg CO}_2\text{-Äqv.}]} \right]. \quad \text{Gl. 5.14}$$



**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche für nicht kommerzielle Zwecke die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, ein Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmateriale unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmateriale nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.